

論文 乾燥収縮によるスラブの反り上がりに関する基礎的研究

都築 正則^{*1}・酒井 正樹^{*1}・一瀬 賢一^{*2}・平田 隆祥^{*2}

要旨：土間スラブや押さえコンクリート等，表面のみ乾燥下にある床部材は，コンクリート断面内の収縮ひずみの差から，反り上がりの発生が懸念される。このため，片面乾燥を行った平板試験体を対象に，上下面の収縮ひずみ差，反り上がり量，拘束による曲げモーメントの測定を行い検証した。結果，平板試験体上下面の収縮ひずみ差は 350×10^{-6} 程度であること，平板の自重の影響がない場合の反り量は，長さ 5m で約 9mm 程度であること，自重の影響がある場合は端部で約 2mm 程度であり，端部より 1.2m 程度から浮きあがること分かった。また，曲げモーメントから算出した縁応力は，本試験条件下では， 0.25N/mm^2 程度であった。
 キーワード：反り上がり，乾燥収縮ひずみ，収縮ひずみ差，片面乾燥，土間スラブ

1. はじめに

土間スラブや押さえコンクリート等，打設面のみ乾燥環境の条件下にある床部材は，コンクリート断面の乾燥収縮ひずみの差(以下，収縮ひずみ差と称す。)が原因とされる「反り上がり」の発生が懸念される。この反り上がりは，スラブの端部が拘束されない場合では，床の段差等の不具合の原因となる。また，デッキスラブ等の下面の型枠や鉄筋による周囲への拘束がある場合や，フォークリフト等の車両の走行により，ひび割れが発生する可能性がある。スラブの「反り上がり」に関する研究事例は，海外では多く報告されている(例えば^{1), 2)} が，国内では少ない^{3), 4)}。本報告では，片面が乾燥下にある平板試験体を対象に，上下面の収縮ひずみ差，反り上がり量，端部拘束による曲げモーメントの測定を行い，収縮ひずみ差によるスラブの反り上がりの現象を把握した。

2. 実験概要

2.1 使用材料および調査

使用材料を表 - 1 に示し，調査表を表 - 2 に示す。コンクリートは，市中工場のレディーミクストコンクリートとし，セメントは普通ポルトランドセメント，粗骨材は硬質砂岩砕石を使用している。コンクリートの呼び名は「24-15-20 N」であり，呼び強度 24，目標スランプが $15 \pm 2.5\text{cm}$ ，目標空気量は $4.5 \pm 1.5\%$ のものとした。

2.2 供試体の測定項目および概要

コンクリートの基礎性状として，供試体を対象とした測定項目および概要を表 - 3 に示す。項目は，圧縮強度，最大圧縮応力の 1/3 静弾性係数(以下，静弾性係数)，割裂引張強度，体積含水率，収縮ひずみとした。養生は，標準水中養生の他，打設後封かん養生を行い，材齢 7 日に脱型した後，打設面以外をアルミテープにてシールし，一面乾燥させる方法(養生 PS7D と称す)も行った。養生 PS7D の供試体は，外気の温度・湿度の影響を受ける実

験室内にて養生した。体積含水率は，養生 PS7D の供試体を各測定時に厚さ 20mm で切断し，表層からの深さごとに求めた。収縮ひずみは，材齢 7 日まで標準水中養生を行った後，恒温恒湿室(温度 20 ± 2 ，湿度 $60 \pm 5\%$ RH)にて乾燥する養生(養生 W7D と称す)の他，脱型後封かん養生したもの(養生 S)，および養生 PS7D のものとした。収縮ひずみの基準長は，材齢 7 日のものとした。

2.3 平板試験体の測定項目および概要

測定項目および概要を表 - 4 に，試験体の状況を写真 - 1 に，試験体の形状を図 - 1 に示す。平板試験体の測定は，

表 - 1 使用材料

記号	仕様
W	工場内上澄水
C	普通ポルトランドセメント，密度 3.16g/cm^3
S1	硬質砂岩砕石，表乾密度 2.63g/cm^3 ，粗粒率 3.00
S2	富津市産山砂，表乾密度 2.60g/cm^3 ，粗粒率 1.60
S3	秩父郡石灰石砕石，表乾密度 2.67g/cm^3 ，粗粒率 2.90
G1	飯能市産硬質砂岩砕石，表乾密度 2.65g/cm^3 ，実積率 60%
G2	西多摩郡硬質砂岩砕石，表乾密度 2.67g/cm^3 ，実積率 60%

表 - 2 調査表(呼び名：24-15-20 N)

W/C (%)	s/a (%)	Air (%)	単位使用量(kg/m^3)						
			W	C	S			G	
					S1	S2	S3	G1	G2
60.1	50.1	4.5	172	287	458	183	275	551	367

AE減水剤標準使用量：C × 0.8%

表 - 3 供試体の測定項目および概要

項目	方法	供試体寸法	養生方法 1
圧縮強度	JIS A 1108	100 × 200mm	標準水中養生，養生 PS7D
静弾性係数(圧縮)	JIS A 1149		
割裂引張強度	JIS A 1113		
体積含水率	2	100 × 200mm	養生 PS7D
長さ変化率(収縮ひずみ)	JIS A 1129-2	100 × 100 × 400mm	養生 W7D，養生 S，養生 PS7D

1 養生 PS7D：打設翌日脱型後，封かん養生

材齢 7 日に打設面のみ乾燥(打設面以外はシール)，(実験室内)

養生 W7D：打設翌日脱型後，標準水中養生 材齢 7 日に乾燥開始(恒温恒湿室内)

養生 S：打設翌日脱型後，全面シールし，封かん養生(恒温恒湿室内)

2 体積含水率は，厚さ 20mm ごとに切断し，直ちに重量，体積を測定する。

その後，乾燥炉(温度：100)で乾燥させ，絶乾重量を測定する。

乾燥前と後の重量差を体積で除して，算出。

*1 大林組 技術研究所 生産技術研究部 工修 (正会員)

*2 大林組 技術研究所 生産技術研究部 工博 (正会員)

表-4 平板試験体の概要および測定項目

平板試験体記号 ^{※1}	形状 (mm)	配筋	概要	測定項目 ^{※2}
No.1	厚さ:120× 幅:600× 長さ:5000	φ6mm@ 100mm シングル	縦置き(自重の影響を受けない), 裏面シール	・収縮ひずみ ・反り量
No.2			平置き(自重の影響を受ける), 裏面シール	
No.3-1 ^{※3}	厚さ:120× 幅:600× 長さ:3500	D10mm@ 200mm ダブル (かぶり 20mm)	H型鋼で上下に拘束し平置き, 裏面シール	・収縮ひずみ ・拘束ボルトのひずみ(曲げモーメントの把握)
No.3-2			H型鋼で上下に拘束し平置き, 裏面シールなし	

※1:全ての平板試験体は、材齢7日まで封かん養生、以降現場にて乾燥開始。
 ※2:収縮ひずみは張付ゲージにて測定、反り量は接触型変位計にて測定(測定開始日は材齢7日以降)、拘束ボルトの変位は、鉄筋張付ゲージにて測定(測定は材齢8日以降)
 ※3:No.3-1は、厚さ120mm×幅600mm×長さ600mmで、拘束のないダミー試験体(配筋量は同等)も作製した。

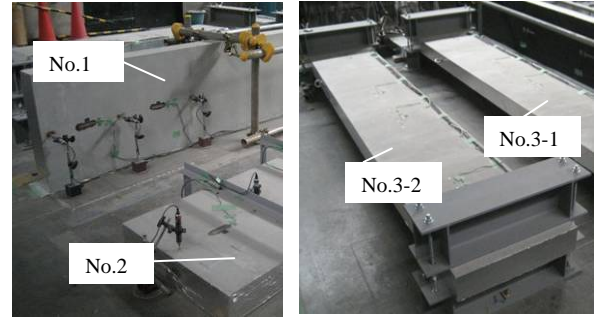


写真-1 平板試験体の測定状況

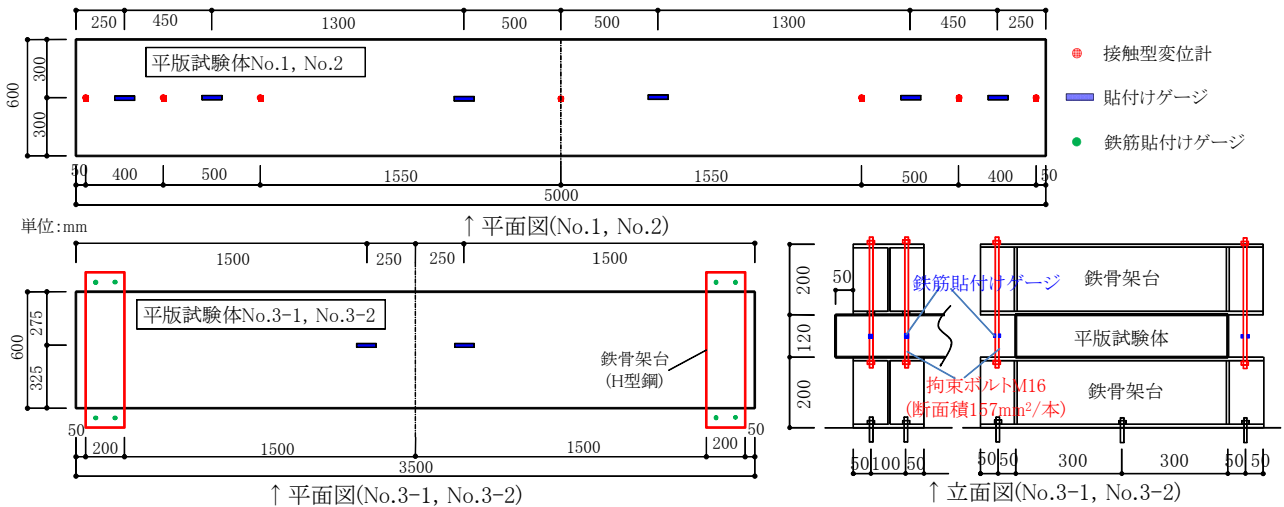


図-1 平板試験体の形状

外気の温度・湿度の影響を受ける実験室内で行った。打設後、封かん養生として材齢4日間はシート養生を行い、3回/1日の散水養生を行った。材齢5日で型枠を脱型し、端面をアルミテープにてシールした後、ゲージの貼付けや測定準備を行った。材齢7日で試験体No.1の縦起こし、No.3-1およびNo.3-2の鉄骨架台への据え付けを行い、自動計測機にておよそ半年、測定を行った。

(1) 平板試験体 No. 1 および No. 2 の測定項目

平板試験体 No.1 および No.2 は反り量およびコンクリート表面の収縮ひずみを測定した。試験体寸法は、長さ5000mmで、ひび割れ防止筋としてφ6mm@100mmのメッシュ筋をスラブ厚の中心位置に配置した。また、収縮ひずみ差の影響を確認するため、両試験体共に、底面にコンクリートとの付着性が良いEVAシートを配置し、裏面から乾燥しないようシールした。試験体 No.1 は平板を縦置きとし、自重を考慮しない場合の反り量を測定した。試験体 No.2 は平板を平置きとし、自重を考慮した場合の反り量を測定した。各試験体の反り量は、接触型変位計にて測定した。変位計は、試験体の乾燥面側から80mm程度離れたところに、鋼材による治具にて固定した。測定開始時(材齢7日)を0点とし、試験体の各点におけるその後の変位の値を、そのまま反り量とした。

収縮ひずみは、試験体 No.1 では、試験体の乾燥面(打設面)および裏面を貼付けゲージで測定し、試験体 No.2 では、乾燥面のみを測定した。試験体 No.1 の裏面のひずみは、EVAシートをゲージの箇所のみ切り欠き、コンクリートに直接貼り付けて測定した。

(2) 平板試験体 No. 3-1 および No. 3-2 の測定項目

平板試験体 No.3-1 および No.3-2 は、鉄骨架台により上下を拘束し、その拘束ボルトの変位を測定することで、曲げモーメントの測定を行った。また、中心付近で上下面の収縮ひずみを貼付けゲージにて測定した。試験体寸法は、長さ3500mmで、試験体にはD10@200mmダブル(鉄筋比=約0.59%)の配筋を行った。試験体 No.3-1 は裏面にEVAシートを配置し、片面乾燥の条件とし、試験体 No.3-2 は上下面とも開放し両面乾燥とした。拘束ボルトは断面積が157mm²のねじ鉄筋を用い、ボルト1本当たり2枚の鉄筋ひずみ計を貼付け、その平均値をボルトのひずみとした。ボルトのひずみは、架台への据え付け後、計測機を読みながらおよそ60~70×10⁻⁶程度、引張側になるよう各ねじを締めつけた。据え付け後の翌日を基準点として、ボルトのひずみを測定した。また、試験体 No.3-1 は、拘束しない長さ600mmのダミー試験体(裏面シール)を作製し、表裏の収縮ひずみ差を測定した。

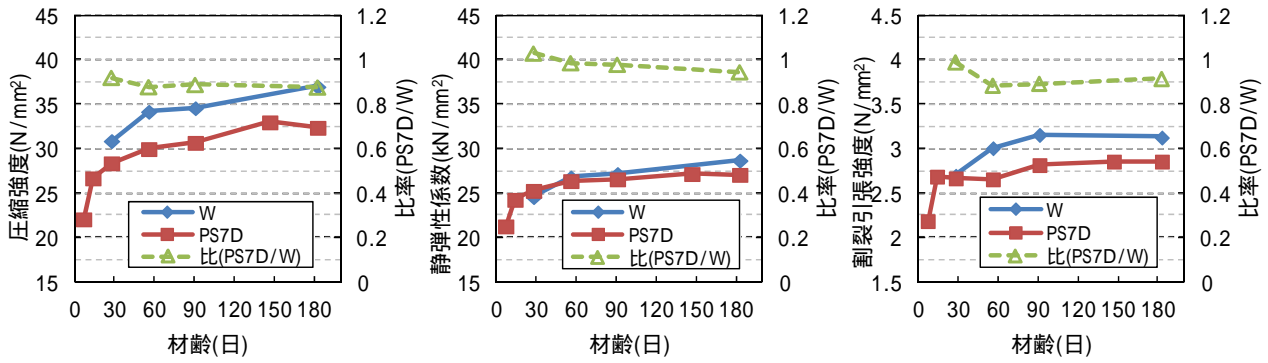


図 - 2 コンクリートの圧縮強度，静弾性係数，割裂引張強度

3. 実験結果

3.1 コンクリートの硬化性状と環境条件

コンクリートのフレッシュ性状は，空気量が 5.5%，スランプは 15.5% 程度であり目標値を満足した。

コンクリートの硬化性状として，圧縮強度，静弾性係数，割裂引張強度試験結果を図 - 2 に示す。標準水中養生試験体(養生 W)は材齢 4 週で 31N/mm² であり，呼び強度を満足した。片面乾燥養生を行った試験体(養生 PS7D)における，材齢 4 週の圧縮強度および割裂引張強度は，それぞれ 28N/mm²，27N/mm² であった。養生 PS7D は，養生 W に比べ，圧縮強度および割裂強度ともに 9 割程度であった。静弾性係数は，養生によらず，材齢 4 週で約 25kN/mm² であった。

平板試験体および養生 PS7D 供試体の環境条件として，実験室内の温度と湿度を図 - 3 に示す。打設時期は，6 月中旬であり，乾燥期間 60 日(8 月下旬)で 30 前後，以降は気温が低下し，乾燥期間 26 週で約 15 前後であった。また，乾燥期間 26 週までの平均湿度は 約 54% であった。

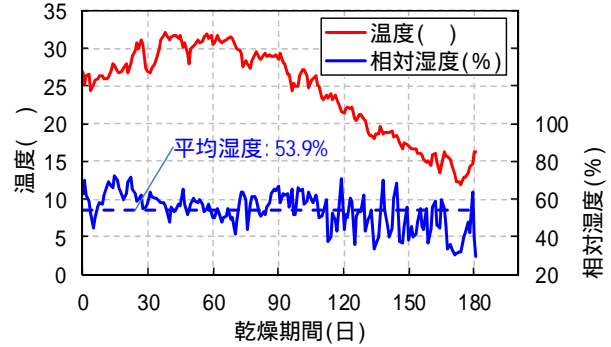


図 - 3 実験室内の環境条件

3.2 供試体断面内の体積含水率の分布

養生 PS7D におけるコンクリート供試体の体積含水率の試験結果を図 - 4 に示す。表層から 70mm 程度まで含水率に大きな差があることを確認した。乾燥期間 3 週(材齢 4 週)で，乾燥面および裏面の体積含水率は，表層では約 9%/vol，下面では約 13%/vol であり，厚さ 120mm で約 4%/vol の含水率の差であった。乾燥期間 3 週から 7 週までは，全体的に 2 %/vol 程度，体積含水率が低下した。乾燥期間 7 週以降は，体積含水率にほぼ変化がなく，表層では 6%/vol 程度，下面では 12%/vol 程度であり，約 6%/vol の差を確認した。

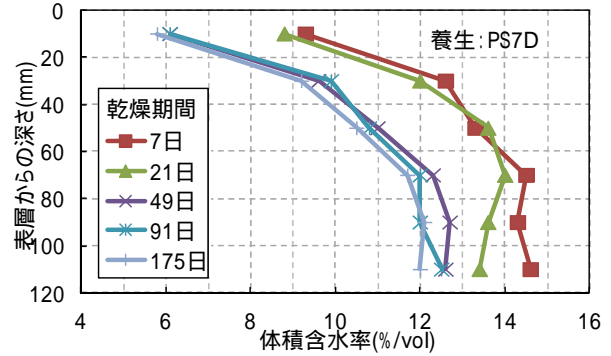


図 - 4 乾燥面からの深さと含水率の関係

3.3 供試体の乾燥収縮ひずみ

各種養生における供試体の収縮ひずみを図 - 5 に示す。乾燥期間 26 週において，養生 PS7D のものは，乾燥面は 650 × 10⁻⁶，裏面は 330 × 10⁻⁶ となり，約 320 × 10⁻⁶ 程度の収縮ひずみ差が確認された。確認された収縮ひずみ差は乾燥期間 60~90 日以降ではほぼ変化がないことが確認された。また，養生 W7D(通常の乾燥収縮ひずみ)では，870 × 10⁻⁶，養生 S(全面封かん養生)のものは 100 × 10⁻⁶ 程度で

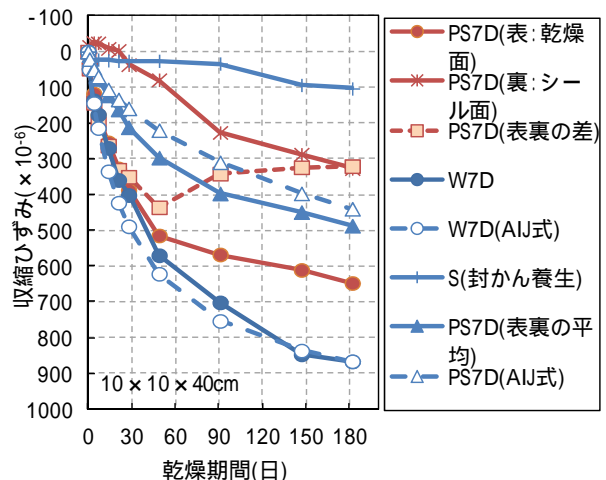


図 - 5 供試体の収縮ひずみ

あった。養生 PS7D における乾燥面と裏面の平均値は，約 490 × 10⁻⁶ 程度であり養生 W7D と養生 S の 1/2 程度となった。また，26 週における W7D の実測値を建築学会

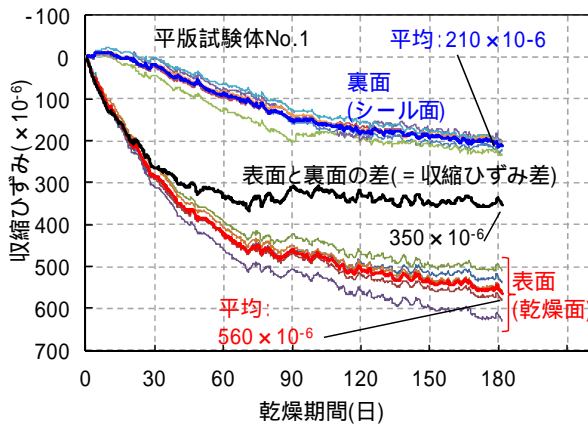


図 - 6 平板試験体 No.1 の収縮ひずみ

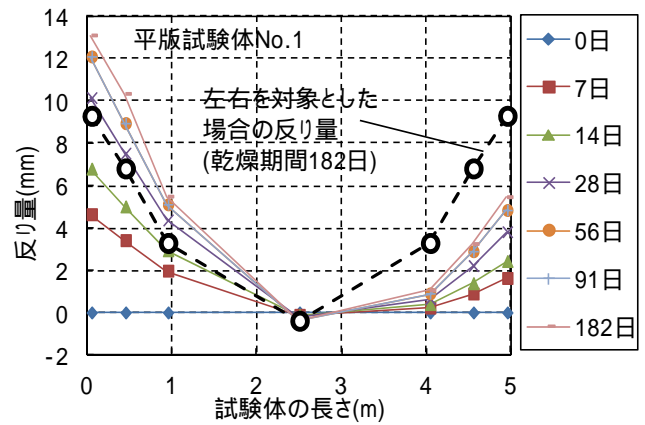


図 - 7 平板試験体 No.1 の反り量

による推定式⁵⁾(以下 AIJ 式と称す。)で、フィッティングすると、体積表面積比(V/S)=40000、相対湿度 = 53.9%とした場合の PS7D の推定値(440×10^{-6})は、実測値の PS7D 平均値(490×10^{-6})と、概ね同等の値となった。

3.4 自重の影響がない平板試験体の収縮と反り

表面貼付けゲージにて測定した、自重の影響がない縦置き平板試験体 No.1 における乾燥面および裏面の収縮ひずみを図 - 6 に示す。各貼付ゲージの平均値で比較すると、乾燥面での平均値で 560×10^{-6} 、裏面での平均値で 210×10^{-6} となり、約 350×10^{-6} 程度の収縮ひずみ差が確認された。確認された収縮ひずみ差は、乾燥期間 70 日以降ではほとんど変化していないことが分かった。この傾向は、PS7D 試験体における表面と裏面の収縮差の傾向とほぼ同じである。接触型変位計にて測定した試験体 No.1 の変位 (= 反り量) を図 - 7 に示す。反り量は、平板試験体の端部側になるほど大きくなることを確認した。また、乾燥期間が長くなるほど、そり量は大きくなることを確認した。各測定位置での反り量が左右対称となっていないのは、縦置きにしているため、反りの変形によって平板試験体自体が平板中央の付近を軸として回転しているためと予想される。このため、図中には左右対称とした場合の反り量を併記した。図より、反りが左右対称に発生すると仮定した場合、中心位置から約 2.5m 部分で約 9mm 程度の反り量となることが分かる。試験体の厚さ (= 120mm) に対する収縮ひずみ差を $1/l$ (曲率) とし、図 - 8 に示すモールの定理により自重を考慮しない場合の変位を計算した。図 - 6 で得られた乾燥期間ごとの収縮ひずみ差を入力値として、計算した結果を図 - 9 に示す。図より反り量の測定値と計算値が、ほぼ一致することが確認できた。

図 - 4 によると、材齢 13 週および 25 週での含水率は表層から 70mm 以降は差が生じていない。つまり、部材厚が本試験(120mm)よりも大きくなった場合でも、調査や鉄筋比が同じ場合であれば、収縮ひずみ差は変化しないと考えられる。このことからモールの定理により、自

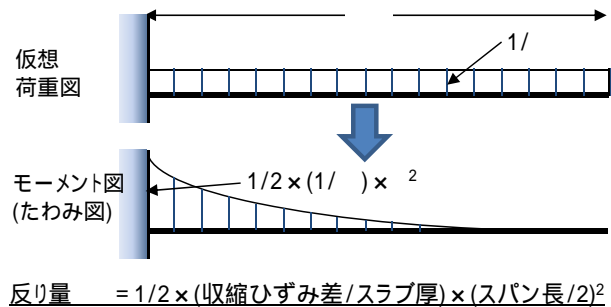


図 - 8 反り量の算出方法(モールの定理)

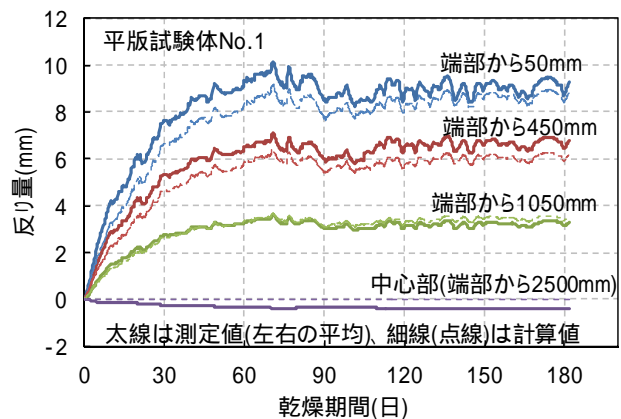


図 - 9 反り量の計算値と実測値

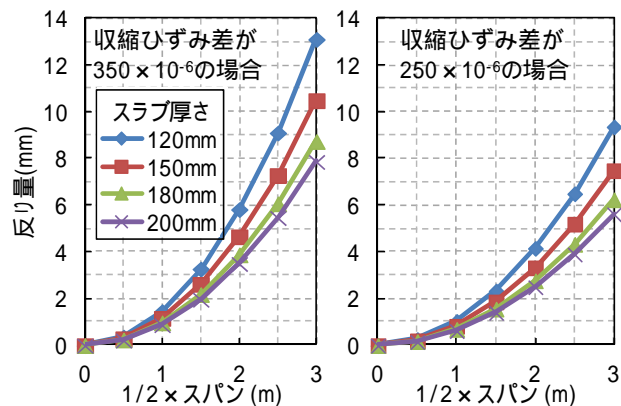


図 - 10 モールの定理によるケーススタディ

重を考慮しない場合の反り量のケーススタディを行った。結果を図 - 10 に示す。収縮ひずみ差が大きいほど、スラ

ブの跨度が長いほど、スラブ厚が小さいほど、反り量は大きくなる事が分かる。

3.5 自重の影響がある平板試験体の収縮と反り上がり

表面貼付けゲージで測定した、自重の影響がある平置き平板試験体(試験体 No.2)の、乾燥面の収縮ひずみを図 - 11 に示す。平置き平板の収縮ひずみは約 500×10^{-6} ($450 \sim 550 \times 10^{-6}$)程度であり、試験体 No.1 の乾燥面よりも 60×10^{-6} 程度小さい結果となった。これは、試験体の自重によるクリープたわみが乾燥面の収縮ひずみに影響しているためと考えられる。

接触型変位計にて測定した反り上がり量を図 - 12 に示す。平置き試験体においても反り上がりが確認された。ただし、乾燥期間 26 週で、その変位は端部で約 2mm 程度と試験体 No.1 に比べ小さい結果となった。また試験体端部から、厚さ 0.1mm の鋼板にて、試験体と実験室のコンクリート床スラブの接触位置を確認したところ、約 1.0~1.2m(平均 1.17m)の位置の箇所試験体が浮きあがっていることを確認した。図 - 10 のモールの定理により跨度 1/2 を 1.2m で計算すると、反り上がり量の計算値は約 2mm となり、実測値と合致する。

乾燥期間と反り上がり量の関係を図 - 13 に示す。試験体 No.2 の反り上がり量は材齢約 70 日以降減少していることが確認できる。材齢初期から、自重によるクリープたわみにより、浮き上がる跨度が徐々に小さくなると仮定すると、モールの定理により、反り上がりの実測値の挙動と計算値を概ね合わせることができる。入力値である収縮ひずみ差は、試験体 No.1 のものとした。その値は材齢約 70 日以降でほぼ一定である。つまり、材齢 70 日以前は、収縮ひずみ差の増加により、反り上がりは大きくなるものの、材齢 70 日以降は、収縮ひずみ差がほぼ一定になるため、浮き上がる跨度の影響のほうが大きくなり、反り上がりが小さくなると考えられる。

図 - 9 および図 - 13 における反り上がりの実測値は、日間の温度変動による影響を受けていることが確認できる。これは、試験体 No.1 では裏面がシールされていることから、試験体 No.2 では裏面が、床スラブに接触していることから、試験体の表裏で温度差が生じ、結果、収縮ひずみ差が生じていることが原因と考えられる。

3.6 裏面の乾燥条件が異なる平板試験体の収縮ひずみ

平板試験体 No.3-1(片面乾燥)と試験体 No.3-2(両面乾燥)の収縮ひずみを図 - 14 に示す。両面乾燥による試験体 No.3-2 のほうが、No.3-1 よりも収縮ひずみが大きかった。また、両試験体とも表面側と裏面側に 300×10^{-6} 程度のひずみ差を確認した。これは、自重によるクリープたわみが大きく影響していると考えられる。ただし、試験体 No.3-1 は片面乾燥による影響により乾燥期間 70 日で収縮ひずみ差が 300×10^{-6} に収束する挙動を示した。

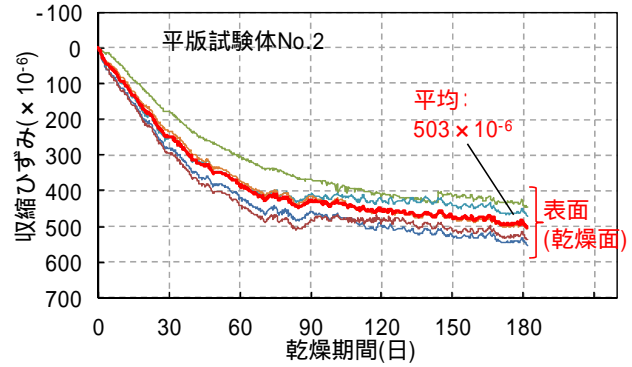


図 - 11 平板試験体 No.2 の収縮ひずみ

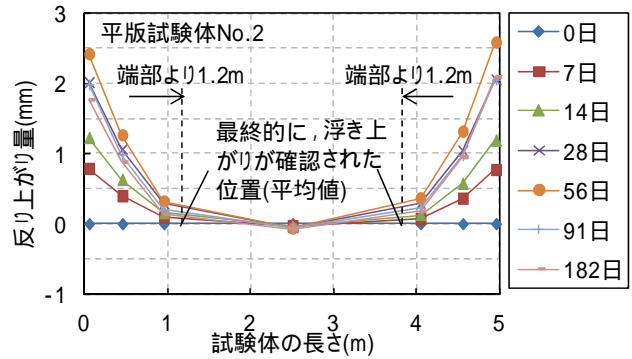


図 - 12 平板試験体 No.2 の反り上がり量

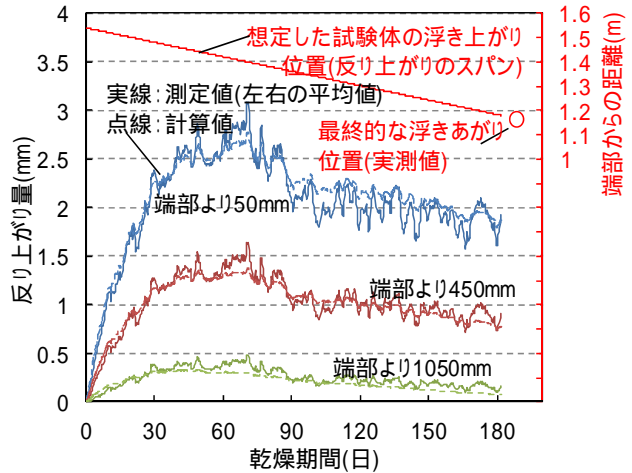


図 - 13 反り上がり量の実測値と計算値

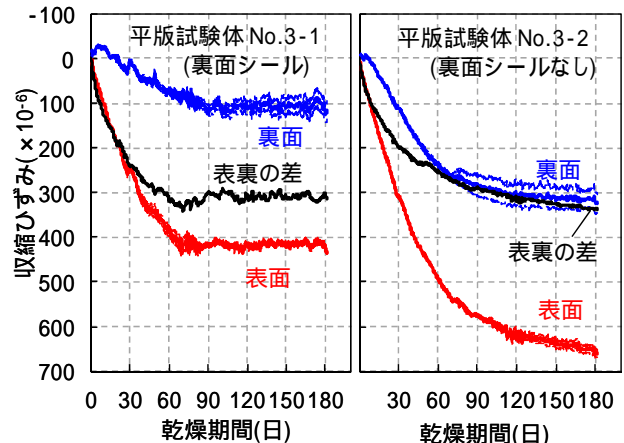


図 - 14 平板試験体 No.3-1, No.3-2 の収縮ひずみ

3.7 反り上がりが及ぼす応力

平板試験体 No.3-1, No.3-2 の拘束ボルトのひずみから図 - 15 に示すように H 鋼端部における曲げモーメントを H 鋼端部の距離とボルトに掛る力で算出した。曲げモーメントおよび縁応力(曲げモーメントを断面係数で除した値)の結果を図 - 16 に示す。乾燥期間 26 週で、曲げモーメントは片面乾燥の試験体のほうが約 300kN・mm 大きく、片面乾燥により曲げモーメントが大きくなる事が確認できた。また縁応力は、No.3-1 では約 0.52N/mm², No.3-2 では約 0.27N/mm² であり、その差は約 0.25N/mm² であった。これが、収縮ひずみ差による反り変形を拘束した場合に発生する引張応力と考える。

No.3-1 のダミー試験体の乾燥面および裏面の収縮ひずみ差(乾燥期間 26 週で約 250×10⁻⁶程度)から、試験体を完全に拘束した場合(反りによる変形がないと仮定した場合)の曲げモーメントおよび縁応力の計算値を図 - 17 に示す。曲げモーメント(M)は式(1)、式(2)から求めた。静弾性係数(E)は、実測値から 25.4kN/mm² とし、図中にはクリープ係数()を 1.0~2.0 と仮定したものを示した。

$$M/(E'I)=1/ \quad \text{式(1)}$$

$$E'=E/(1+) \quad \text{式(2)}$$

ここに、1/ : 曲率(収縮ひずみ差/部材厚), I: 断面 2 次モーメント, E: 静弾性係数, : クリープ係数とする。

結果、反りによる変形を 0 とした場合、約 1.1~1.7N/mm² 程度の縁応力が働くことが分かった。本試験範囲内では、ボルトによる拘束のみであり、発生した応力が小さかったと考える。デッキスラブ等の実際の部材では、反り変形を拘束する力は試験よりも大きいことが考えられ、ひび割れに対しては、反りによって発生する応力も留意する必要があると考える。実際に作用する応力の測定については、今後の検討課題としたい。

4. まとめ

片面乾燥がおよぼす収縮ひずみ差によるスラブの反り変形に関する現象を把握し、反り量および拘束により発生する応力を検討した。結果、以下のことが分かった。

- (1) 片面乾燥によって、体積含水率は、乾燥面と裏面で約 6%/vol の差であった。また平板試験体における乾燥収縮ひずみの差は 350×10⁻⁶程度であった。
- (2) 自重の影響がない場合、モールの定理により反り変形の推定値と実測値は概ね合致した。スパン 5m の試験体で、その反り量は、端部で約 9mm 程度であった。
- (3) 自重の影響がある場合、スパン 5m の試験体で端部の反り量は約 2mm 程度であった。浮き上がる部分は、端部より 1.2m 程度の部分であった。
- (4) 片面乾燥による浮き上がりが及ぼす縁応力は、本試験内による拘束下では約 0.25N/mm²であった。

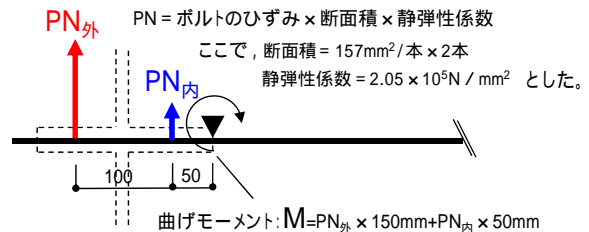


図 - 15 曲げモーメントの算定方法

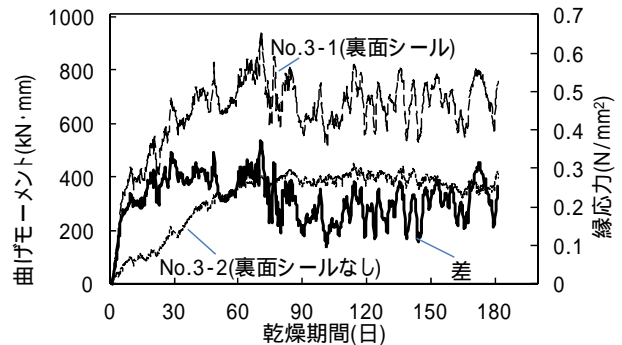


図 - 16 算定した曲げモーメントおよび縁応力

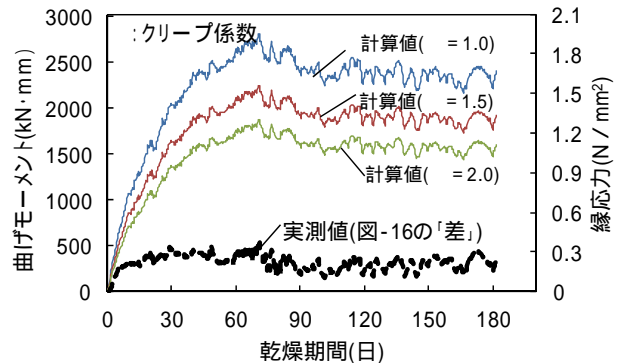


図 - 17 反り変形を 0 とした場合の曲げモーメントおよび縁応力の計算値

謝辞：本報告全般において、小柳光生氏に多々なるご指導を頂きました。ここに感謝の念を記します。

参考文献

- 1) Wayne W. Walker and Jerry A. Hollan : The First Commandment for floor Slabs, Thou Shalt Not Curl Nor Crack...(hopefully), Concrete International, Vol.21, No.1, pp.47-53, 1999
- 2) Bruce A. Suprenant :Why Slabs Curl. Part . A look at the curling mechanism and the effect of moisture and shrinkage gradients on the amount of curling. Concrete International, Vol.24, No.3, pp.56-61, 2002.3
- 3) 鍋島菊麿：コンクリート土間の上反り現象はなぜ起きる - 事例でさぐる原因と対策 -, 建築技術, No.439, pp.122-127, 1988
- 4) 伊奈倫之：床部材の変形に関する調査報告, コンステックテクニカルレポート, No.14, pp.25-29, 2011
- 5) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ制御設計・施工指針(案)・同解説, pp53, 2006